doi:10.13866/j. azr. 2020. 03. 05

锡林河流域上游河谷湿地景观格局演变及其驱动力[①]

周亚军[1]， 刘廷玺[1,2]， 段利民[1,2]， 王怡璇[1,2]， 李 霞[1]， 黎明扬[1]
(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018;
2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要: 为全面揭示锡林河流域上游河谷湿地格局变化过程及驱动因素,选取 1989—2015 年 12 景 Landsat 卫星影像为数据源,采用质心迁移模型和景观指数方法,研究了区域湿地景观的组成及演变趋势,并探讨了湿地景观变化的主要驱动因子。结果表明:① 1989—2015 年,锡林河上游湿地面积整体呈减小趋势,变化率为 $-1.21\ km^2 \cdot a^{-1}$;湿地面积占比在 2.55% ~3.75%。湿地质心整体向西北方向迁移,斑块面积在南北方向呈缩小趋势,而在东西方向呈延长趋势。② 类型水平上,1995—2006 年流域湿地斑块数量变化剧烈,1989—2000 年斑块数量增加,表明景观破碎度增大,2011—2015 年斑块数量呈下降趋势,景观斑块向规则化和集中化趋势发展;景观水平上,湿地最大斑块所占比例减少,斑块趋于复杂化,景观破碎度增大,香农多样性、香农均匀度指数整体呈减少趋势,湿地景观分布向均衡方向发展。③ 湿地面积对人口数量和牲畜量响应较为敏感,过度放牧是导致该区域湿地不断萎缩、景观多样性改变的关键驱动力。

关键词: 遥感; 湿地; 景观格局; 演变; 驱动力; 锡林河流域

湿地作为地球的三大生态系统之一,具有极其丰富的生物多样性,也是人类赖以生存的环境之一[1]。在调节气候、涵养水源、补充地下水和保护生物多样性等方面,发挥着不可替代的重要作用[2],被誉为“地球之肾”[3-4]。湿地生态系统出现逆向演替、植被衰败及退化、土壤沙化和生物多样性等问题,都深刻反映出区域生态环境的变化,对干旱区水资源和生态环境产生重要的影响[5]。内蒙古湿地面积在全国居第 3 位,锡林河流域河谷湿地是内蒙古湿地的重要组成部分[6-7],及时了解掌握干旱区河谷湿地分布和变化趋势,对防治草原腹地的土壤侵蚀、沙化以及来自我国西部的沙尘侵害具有重要意义。

景观格局能够反映景观的空间格局、大小、形状以及斑块在空间上的分布与组合规律[8-9],景观指数高度浓缩了景观格局信息,是刻画其结构组成和空间配置某些方面特征的简单定量指标[10],随着景观生态学的不断发展,景观生态学方法已经广泛用于土地利用变化和湿地类型演替方面。近年来,遥感卫星技术以其时效性、覆盖范围广和信息量大等特点[11],在进一步推动湿地景观格局及动态过程研究[12]。利用遥感手段对湿地景观格局的分析成为生态学研究的热点[13-17]。生态系统是由不同的景观类型组成,在自然和人类共同干扰下景观不断发生变化[18],科学的监测评价景观格局动态变化不仅可以减缓生态系统的退化,还有利于生态的可持续发展。孙倩等[19]分析了西部绿洲土地利用/覆被时空变化及其景观格局的变化。闫晓露等[20]通过 RS 和 GIS 技术研究了辽东湾北部围垦区内外滨海湿地景观的演替路径与模式。Couvillion 等[21]利用多期遥感影像和聚合指数(AI)对路易斯安那州滨海湿地 1985—2010 年的景观格局演变进行了定量分析。

锡林河流域是典型的干旱、半干旱草原区的内陆河流域,近年来,其景观格局的变化受到自然环境和人类生产生活的双重制约,生态系统脆弱且敏感,湿地结构和生态功能退化明显[22],对地区水资源和

① **收稿日期:** 2019-08-30; **修订日期:** 2019-09-22
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51939006);国家国际科技合作专项(2015DFA00530);国家自然科学基金项目(51909122);教育部创新团队发展计划(IRT_17R60);科技部重点领域创新团队(2015RA4013);内蒙古自治区草原英才产业创新创业人才团队;内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队(NDTD2010-6)资助
作者简介: 周亚军(1994-),男,硕士研究生,研究方向为遥感水文. E-mail: 894750446@qq.com
通讯作者: 刘廷玺. E-mail: txliu1966@163.com

生态环境造成严重影响,开展对干旱区草原内陆河流域河谷湿地的景观格局的研究尤为重要。因此,本文以内蒙古锡林河流域河谷湿地为研究对象,利用遥感数据对湿地信息进行提取分析,开展河谷湿地的时空演变分析,及时掌握湿地的现状和变化特征,以期为湿地的恢复和保护提供科学依据,促进生态文明建设。

1　研究区域与研究方法

1.1　研究区概况

锡林河流域位于内蒙古中部锡林郭勒盟,发源于赤峰市克什克腾旗宝尔图山流经锡林郭勒盟阿巴嘎旗,在贝力克牧场转向西北流经锡林浩特市,最终注入查干诺尔沼泽地自然消失。好来吐郭勒、好来郭勒、呼斯特河是其最主要的 3 条支流[23]。主河全长 175 km(图 1),河谷宽 1 ~5 km,锡林河河源至库尼苏曼为流域上游(43°26′ ~44°08′N,116°02′ ~117°12′E),流经丘陵地带,河道异常弯曲,河流由东向西,河道比降 1/150 ~1/400[24]。该区域属大陆性温带半干旱气候,流域多年平均降水量约 300 mm,蒸发量达 1 900 mm(φ20 cm 口径)[25]。

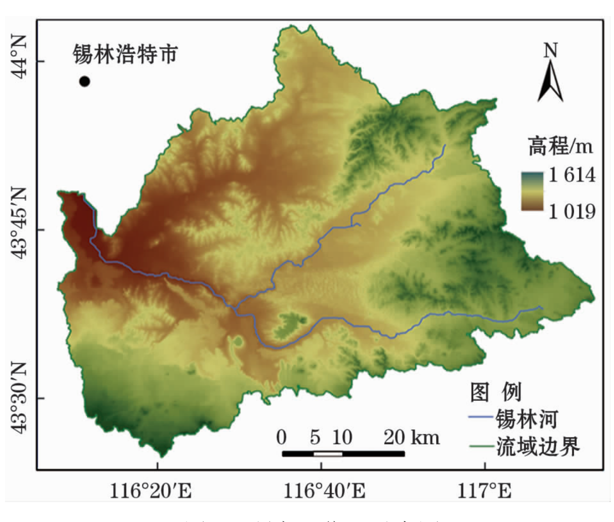


图 1　研究区位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of study area location

1.2　数据来源及处理

为准确揭示研究区景观格局动态变化特征,根据研究区已有卫星数据的影像质量、成像时间等信息,保证云量低于 5%,选取锡林河流域上游 1989—2015 年近 30 a 的 Landsat 遥感影像,选择植物生长旺盛的月份(7月中旬至8月下旬),以便于不同下垫面信息的准确提取,影像数据(表 1)取自美国地质调查局(USGS)网站(http://earthexplorer.usgs.gov/)以及地理空间数据云网站(http://www.gscloud.cn/)。

表 1　遥感影像相关信息

Tab. 1　Information of the remote sensing images

图像类型	行列号	空间分辨率/m	日期/年 - 月 - 日
TM	124/029	30	1989 - 08 - 05
TM	124/030	30	1989 - 08 - 05
TM	124/029	30	1995 - 07 - 21
TM	124/030	30	1995 - 07 - 21
TM	124/029	30	2000 - 07 - 10
TM	124/030	30	2000 - 07 - 10
TM	124/029	30	2006 - 07 - 11
TM	124/030	30	2006 - 07 - 11
TM	124/029	30	2011 - 08 - 10
TM	124/030	30	2011 - 08 - 10
OLI	124/029	30	2015 - 07 - 12
OLI	124/030	30	2015 - 07 - 12

采用 ENVI5.3 软件对获取的遥感影像进行几何校正、辐射定标、直方图均衡化、研究区影像裁剪等预处理,以提高目视解译精度。对 TM 和 OLI 数据分别采取 4、3、2 和 5、4、3 波段组合方式来增强植被和水分差异信息。根据影像的色调、纹理、几何特征等建立相应类型地物的遥感解译标志。2018 年 6—9 月通过野外踏勘选取 170 个点,其中 120 个作为分类样本,50 个作为验证样本。采用支持向量机方法对预处理的 1989、1995、2000、2006、2011 年和 2015 年的影像进行分类,实现锡林河流域上游湿地景观信息的目视解译。分类后精度达到 87% 以上,满足本研究需求。

1.3　研究方法

1.3.1　干旱区湿地与非湿地分类指标体系　在干旱区湿地的分类体系上,结合国际上《湿地公约》及国内《中华人民共和国国家标准:湿地分类》分类体系,同时考虑在 30 m 分辨率的遥感影像中划分湿地类型的可分辨性,并参考近年来国内调查研究[26-28],将干旱区湿地分为:河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地。研究区内河流和湖泊湿地面积占比较小,所以,将其与沼泽湿地一起进行后续相关分析。根据我国《土地利用现状分类标准》,将研究区其他类景观分为草地、耕地和其他(表 2)。

1.3.2　动态变化分析方法　综合动态度、转移矩阵和标准椭圆差,在一定的时间和空间上能够反映湿

表 2　干旱区湿地与非湿地分类指标体系

Tab. 2　Wetland and non-wetland classification index system in arid area

一级类型	二级分类	含义
湿地	河流湿地	天然河流、溪流等流动湿地，分布于平坦/低洼地区
	湖泊湿地	湖泊等相对静止的水面。无挺水植物
	沼泽湿地	以喜湿薹草及禾本科植物占优势，多年生植物、植物郁闭度不低于 15%
草地		生长草本植物为主的土地，分布于山坡、缓坡区，地面表层除冬季降雪覆盖，土壤常年处于干燥状态
耕地		种植农作物的土地，包括熟地，新开发、复垦、轮作地；多为喷灌圈
其他		包括裸地、建设用地和沙地、城镇、公路

地的动态演化过程，从 6 个阶段不同景观类型的变化差异和变化程度来解析锡林河流域河谷湿地的变化趋势。

（1）湿地动态度模型[29]

$$LC = (U_1 - U_2)/U_2/T \times 100\% \qquad (1)$$

式中：LC 为 T 年的湿地变化动态度，%；U_2 为研究初期湿地面积，km^2；U_1 为研究末期湿地面积，km^2；T 为时间，a。动态度不仅可以描述湿地相对于自身变化的程度，而且能很好地反映湿地的时间变化特征。

（2）湿地面积质心转移模型

土地利用的空间变化可以用其面积质心分布的变化情况来反映，土地利用质心迁移模型可以很好地从空间上描述土地利用类型的时空演变过程[30]。利用 ArcGIS 10.4 软件得到各个时期湿地的质心坐标，通过土地利用面积质心迁移模型，计算各类景观要素的转移方向和转移距离。质心转移的距离按照式(2)计算得出。

$$C = \sqrt{(X_{t_2} - X_{t_1})^2 + (Y_{t_2} - Y_{t_1})^2} \qquad (2)$$

式中：X_t、Y_t 表示第 t 年某种土地利用类型分布质心的坐标；C 表示第 i 个小区域监测期初 t_1 到监测期末 t_2 在水平方向的转移距离，km。

1.3.3　景观格局演变分析方法　使用景观指数方法能高度浓缩景观格局信息，反映区域景观结构组成和空间配置[31]，从而定量分析锡林河流域河谷湿地的景观格局演变特征。本文选取了 8 个常用的景观指数：斑块所占景观面积比例（PLAND）、斑块结合度指数（COHESION）、景观形状指数（LSI）、斑块密度指数（PD）、斑块数目指数（NP）、最大斑块指数（LPI）、香农多样性指标（SHDI）、香农均匀度指标（SHEI），指数计算在 FragStats 4.2 中完成。

2　结果与分析

2.1　流域上游土地利用时空变化过程

由 1989—2015 年锡林河上游分类结果（图 2）和景观分布面积（表 3）可以看出：草地在研究区中占比最大，占总面积的 95.73% ～96.49%，2000 年草地面积减至最低值 3 272.38 km^2，2006 年草地面

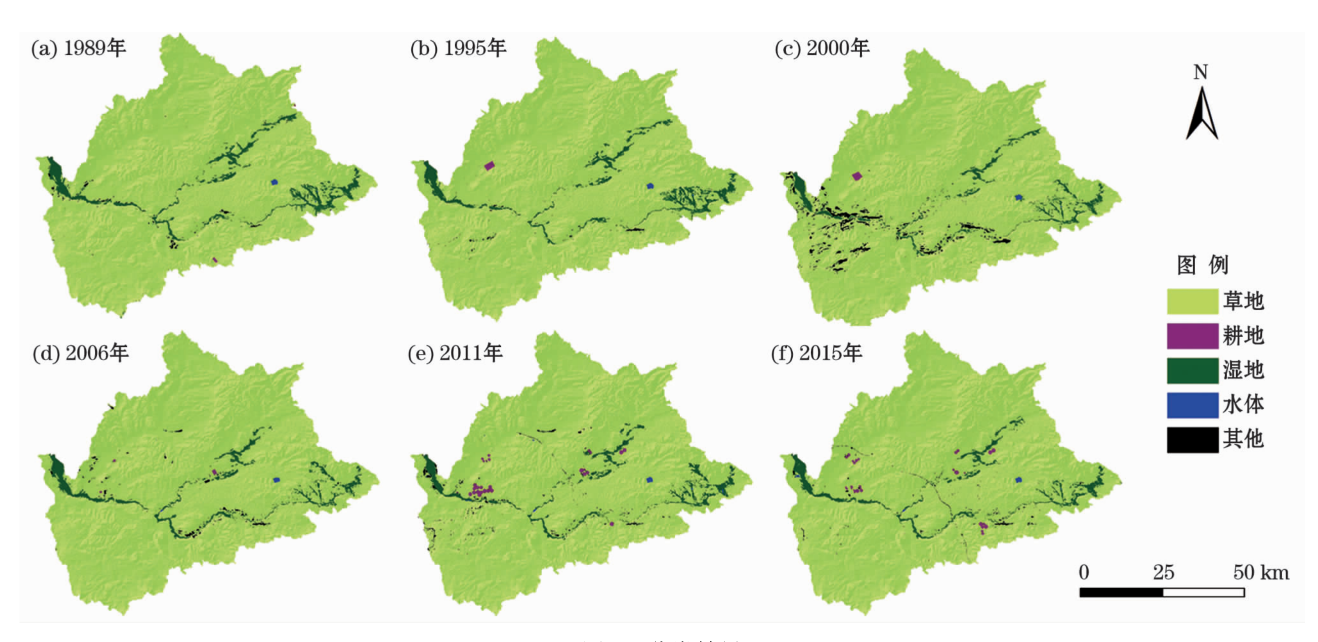


图 2　分类结果

Fig. 2　Classification result chart

表 3　锡林河流域上游景观分布面积变化

Tab. 3　Change table of landscape distribution area in the upper reaches of Xilin River Basin

类型	1989 年		1995 年		2000 年		2006 年		2011 年		2015 年		1989—2015 年变化率 /($km^2 \cdot a^{-1}$)
	面积 /km^2	比例 /%	面积 /km^2	比例 /%	面积 /km^2	比例 /%	面积 /km^2	比例 /%	面积 /km^2	比例 /%	面积 /km^2	比例 /%	
草地	3 278.85	95.92	3 290.24	96.25	3 272.38	95.73	3 298.61	96.49	3 287.54	96.17	3 297.57	96.46	0.72
耕地	0.93	0.03	3.87	0.11	3.86	0.11	1.67	0.05	16.17	0.47	11.86	0.35	0.42
湿地	128.29	3.75	117.08	3.42	87.23	2.55	104.07	3.04	96.04	2.81	96.76	2.83	-1.21
水体	2.49	0.07	2.93	0.09	2.04	0.06	2.08	0.06	4.13	0.12	2.94	0.09	0.02
其他	7.89	0.23	4.34	0.13	52.94	1.55	12.01	0.35	14.56	0.43	9.33	0.27	0.06
合计	3 418.45	100	3 418.45	100	3 418.45	100	3 418.45	100	3 418.45	100	3 418.45	100	-

积增加至最高 3 298.61 km^2;耕地面积变化幅度较大,面积比例在 0.03% ~0.47% ,1989 年耕地面积最低为 0.93 km^2,2011 年达到最高值 16.17 km^2;湿地面积整体占 2.55% ~3.75% ,1989 年湿地面积最大 128.29 km^2,1989—2000 年湿地面积流失严重,2000 年湿地面积减至最低为 87.23 km^2,2000—2006 年湿地面积开始增大,2011 年之后逐渐趋于稳定,整体变化率为 $-1.21\ km^2 \cdot a^{-1}$;水体在整个上游土地利用类型中占比最小,在 0.06% ~0.12% ,2000 年水体面积减至最小 2.04 km^2,2011 年增至最大4.13 km^2;其他土地利用类型包括裸地和建设用地,占总面积的 0.13% ~1.55% ,1995 年所占面积最低4.34 km^2,至 2000 年增至最高 52.94 km^2,2006 年之后其面积占比先增加后减少。近 30 a 来草地、耕地、水体和其他面积呈上升趋势,增速分别为 $0.72\ km^2 \cdot a^{-1}$、$0.42\ km^2 \cdot a^{-1}$、$0.02\ km^2 \cdot a^{-1}$、$0.06\ km^2 \cdot a^{-1}$。

根据湿地面积变化趋势,以 2000 年和 2006 年为时间节点分析湿地景观转化过程,通过锡林河流域上游不同时期各土地利用类型数据进行空间叠加分析,得到 3 个时段的土地利用类型转移矩阵(表 4)。1989—2000 年,湿地面积较初期有所减少,湿地转入面积 10.59 km^2,转出面积为 51.65 km^2。2000—2006 年,湿地转入面积 34.09 km^2,转出面积为 17.26 km^2,呈增加趋势。2006—2015 年,湿地转入面积 17.35 km^2,转出面积为 24.66 km^2,草地、水体和其他景观向湿地转入总面积小于湿地转出面积。

由图 3 可知,1989—1995 年湿地质心向西移动,移动距离为 4.21 km,1995—2000 年湿地质心向东移动,移动距离为 2.18 km,2000—2006 年湿地质心又转向西北方向,且 1995—2000 年和 2000—2006 年质心移动距离较小。2006—2011 年湿地质心向西南方向迁移 5.06 km,研究时段内河谷湿地整体呈现出东西向位置迁移变化。2011—2015年东南

表 4　1989—2015 年锡林河流域上游土地利用类型面积转移矩阵

Tab. 4　Transfer matrix of land use type area in the upper reaches of Xilin River Basin during 1989 - 2015 /km^2

时段/年	景观类型	草地	耕地	湿地	水体	其他
1989—2000	草地	3 216.71	0.92	50.86	0.34	3.55
	耕地	3.71	0	0.15	0	0
	湿地	10.38	0.01	76.64	0.20	0
	水体	0.05	0	0.05	1.95	0
	其他	48.01	0	0.59	0	4.34
2000—2006	草地	3 231.31	3.32	16.89	0.33	46.77
	耕地	1.31	0.33	0.03	0	0
	湿地	33.21	0.15	69.97	0.02	0.71
	水体	0.10	0	0.28	1.69	0.01
	其他	6.44	0.06	0.06	0	5.45
2006—2015	草地	3 264.13	0.51	24.19	0.06	8.68
	耕地	10.70	1.10	0.03	0	0.03
	湿地	16.58	0.07	79.41	0.05	0.65
	水体	0.65	0	0.30	1.97	0.01
	其他	6.55	0	0.14	0	2.64

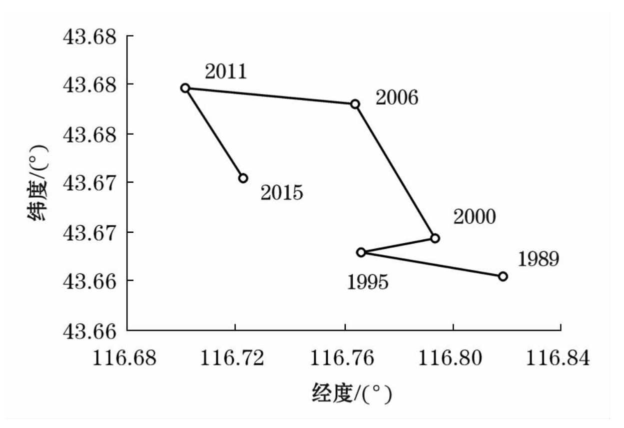


图 3　锡林河流域上游河谷湿地景观质心位置变化

Fig. 3　Centroid position change of wetland landscape in the upper reaches of Xilin River Basin

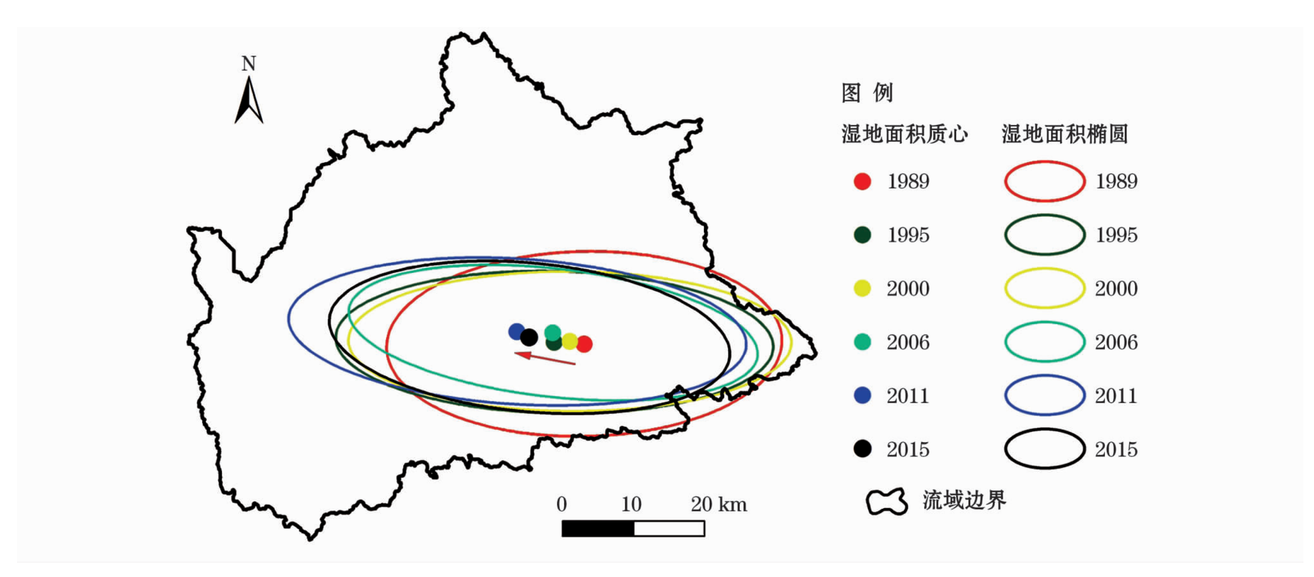


图 4 1989—2015 年湿地斑块面积质心变化

Fig. 4 Variation of centroid of marsh patch area from 1989 to 2015

方向迁移距离较短，为 1.89 km，湿地迁移趋于稳定趋势。从湿地面积标准椭圆可以看出（图 4），近 30 a 湿地呈现出向东—西方向扩张的变化。1995—2000 年和 2006—2011 年湿地减少主要集中在西北方向，1989—2015 年湿地斑块面积标准差椭圆长轴方向均为东西方向，1989 年标准差椭圆的离心率最大，1989 年之后，标准差椭圆离心率变小且波动不大，长轴和短轴均呈现缩短趋势，表明河谷湿地斑块面积在南—北方向呈缩小趋势，而在东西方向呈延长趋势，整体湿地景观呈破碎化趋势。

2.2 流域上游景观格局指数变化

2.2.1 斑块类型级别 斑块面积比例指数（PLAND）反映斑块类型空间分布情况[32]。由于草地斑块面积相对其他类景观占比较大，对纵坐标进行了对数转化。由图 5a 可知，1989—2015 年耕地和其他类景观 PLAND 波动较大，草地、湿地和水体波动较小；6 个时期草地景观面积占比最大，在 51% ~53% 之间波动，湿地面积占比在 1989年最大（2.03%），

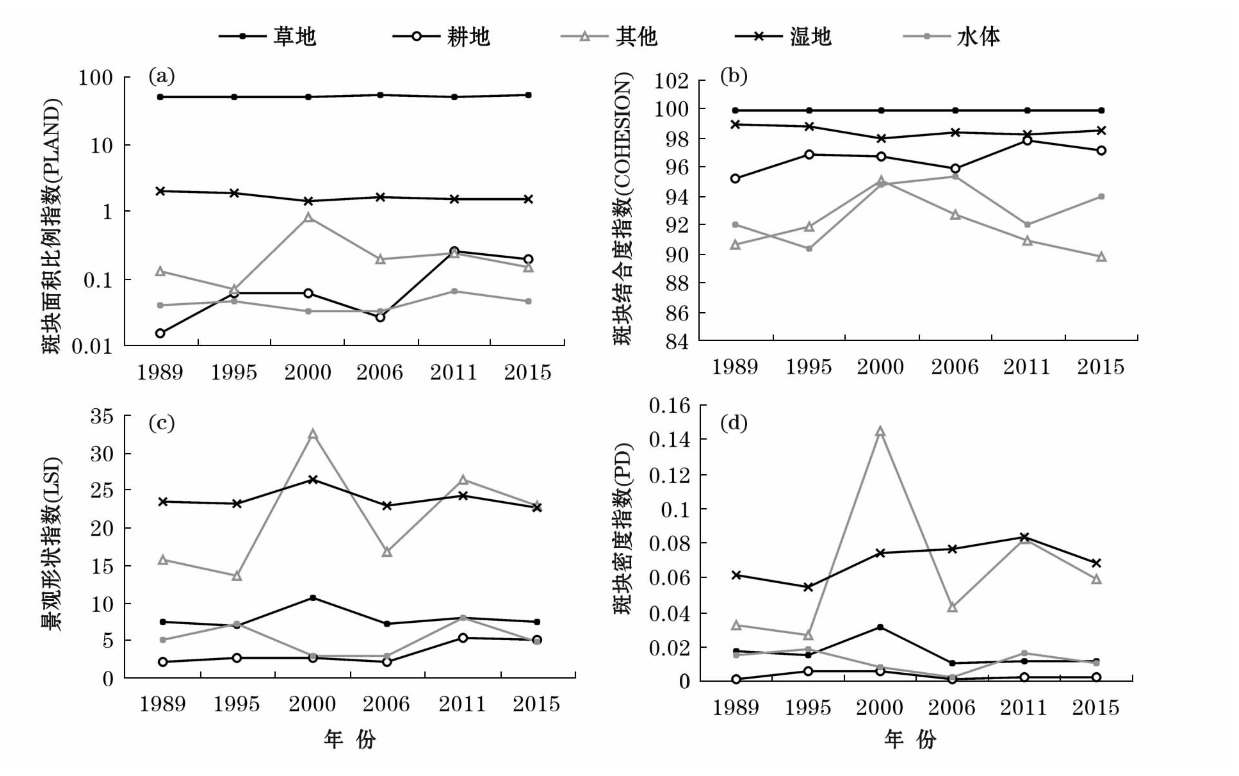


图 5 不同景观类型的 4 个指数年际变化

Fig. 5 Inter-annual changes of four index in class-level

到 2000 年减至最低(1.37%),其他类景观所占比重 2000 年最高(0.84%),水体面积占比波动较小,在 0.03% ~0.047% 浮动。

斑块结合度指数(COHESION)表征景观斑块的自然连通性[33]。1989—2015 年水体、耕地和其他景观受人为影响,相互之间的连通性较差,波动剧烈。草地和湿地的连通性波动较小,整体的连通性较好(图 5b)。

景观形状指数(LSI)是表征景观结构复杂性的指数[34],值越大即形状越复杂。由图 5c 可知,1989—2015 年草地、湿地和其他 3 类景观呈上升趋势,在 1995—2000 年增长幅度较大,2006 年之后变化较为平稳。水体和耕地 2 类景观类型虽有一定的波动,但都比较微小,结构复杂性低。2011—2015 年景观均呈下降趋势,景观斑块向规则化和集中化趋势发展。

斑块密度指数(PD)是反映景观破碎度的指标[35]。近 30 a 来由于沼泽的 PD 值缓慢增长,呈上升趋势,说明湿地的破碎度在增大(图 5d)。其他类景观起伏剧烈,表明在人类活动影响下,景观在退化与恢复的过程中进行着自然演替,整体呈增长趋势。水体和耕地在空间上的分布范围较小,PD 值在 0 ~ 0.2 之间浮动,波动较小,变化趋势不明显。草地面积最大,PD 值略有降低,表明草地的破碎化程度降低,破碎变化不明显。

2.2.2　景观级别　景观水平的景观格局指数可以在较大的空间尺度上反映区域整体景观特征,从景观水平的 4 个指数来分析锡林河流域上游河谷湿地的景观格局演变特征。由图 6 可以看出,1989—1995 年 NP 值先趋于稳定(771 ~ 807 个),到 2000 年 NP 数量急剧增长,增加至 1 684 个,说明景观破碎度程度增大。到 2006 年之后,NP 值先增加后减少,NP 个数从 848 个增加至 1 246 个,到 2015 年降低至 965,说明景观破碎度先增大,之后逐步恢复。LPI 值整体呈上升的趋势,1989—1995 年 LPI 呈增长趋势,到 2000 年 LPI 值减至最低(51.65),LPI 值减少,说明最大斑块所占的比例减少,景观破碎度增大。2006 年 LPI 增至最大(52.08),说明斑块趋于复杂化,2011 年之后,LPI 呈上升趋势,说明最大斑块所占的比例增加,景观破碎度减小。

SHDI 是描述景观丰富程度的指标,当整个景观由一个斑块组成时,SHDI 值为 0,当 SHDI 值升高,说明景观斑块的类型增加。SHEI是比较景观不同

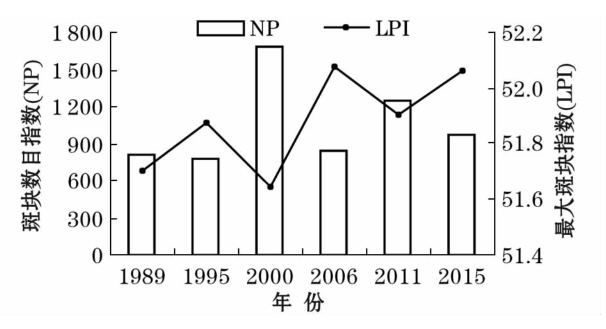


图 6　景观级别 NP 和 LPI 指数年际变化

Fig. 6　Inter-annual changes of NP and LPI in landscape-level

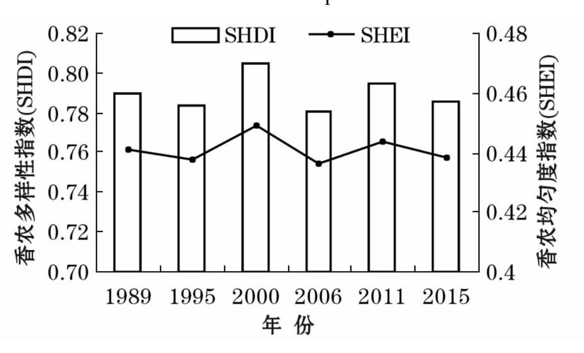


图 7　景观级别 SHDI 和 SHEI 指数年际变化

Fig. 7　Inter-annual changes of SHDI and SHEI in landscape-level

时期多样性变化的指标,反映景观中各斑块类型在面积上分布的均匀程度,SHEI 越大,研究区景观类型面积分布越不均匀。由图 7 可知,2006 年的 SHDI 和 SHEI 值均最低,说明这一时期的景观破碎度小,分布较均匀,2000 年的 SHDI 和 SHEI 值均最高,景观破碎程度较高,各景观类型面积分布较不均匀。整体 SHDI 和 SHEI 呈下降的趋势,说明湿地景观分布向均衡方向发展,景观破碎化程度在降低。

2.3　流域上游湿地景观变化驱动因素

2.3.1　气候因素　为研究气候变化对锡林河流域上游河谷湿地变化的影响,对内蒙古锡林浩特站的年降水量与年平均气温变化情况进行分析,气象数据来源于中国数据气象网。

将气象数据对应遥感数据时间节点分 5 段进行分析,由图 8 可知,1989—1995 年平均降水量 303.8 mm,年平均气温 3 ℃,降水量较大,年平均气温最低,与该时段湿地面积最大有一定联系。1995—2000 年平均降水量降低至 287.4 mm,年平均气温上升至 3.6 ℃,该时段内湿地面积呈减少趋势。2006—2011 年均降水量为 220 mm,为时段内最小值,时段年平均气温达到 3.3 ℃,蒸发量增大,导致湿地面积再度减少。2012年出现时段内降水量和

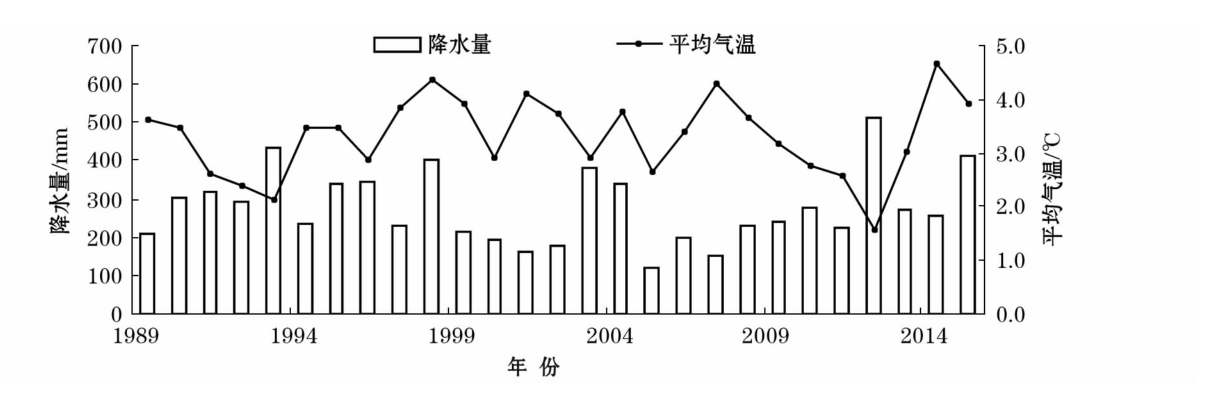


图 8 1989—2015 年锡林浩特站降水量和平均气温变化

Fig. 8 Annual precipitation and average temperature of Xilin Hot Station from 1989 to 2015

表 5 1989—2015 年锡林河流域上游湿地面积与年降水量、年平均气温相关性分析

Tab. 5 Regression analyses between the area of wetland and annual precipitation and annual average temperature in Xilin River Basin from 1989 to 2015

景观类型	年降水量		年平均气温	
	皮尔逊相关性	显著性	皮尔逊相关性	显著性
湿地	0.52	0.30	-0.64	0.17

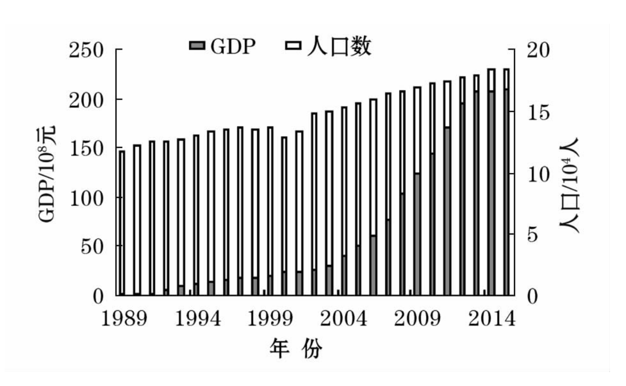


图 9 锡林浩特市 GDP、人口年变化

Fig. 9 GDP and population in Xilin Hot

气温极值,降水最大值 511.7 mm,气温最小值为 1.6 ℃,对该时段内湿地面积的增长有积极作用。从相关性分析可以看出(表 5),湿地面积与降水量存在正相关关系,相关系数为 0.52,与气温存在负相关关系,相关系数为 0.64,说明湿地面积对降水量和气温具有一定响应关系。

2.3.2 人类活动驱动因素 人类活动是锡林河流域河谷湿地减少的主要原因之一,流域主要分布在锡林郭勒盟锡林浩特市,因此,选用锡林浩特市的地区生产总值(GDP)进行人类活动对于湿地影响的分析。

自 1989—2015 年,地区生产总值、人口数整体呈连续的增长趋势(图 9)。2000 年之后,GDP 迅速增长,近 30 a 间增长 124 倍。对比而言,人口增长约 20% 以上,增长幅度较小,说明在经济发展过程中,生产方式在发生转变,不再是以人工劳动为主的发展模式。从相关性分析可以看出(表 6),湿地面积与 GDP 和人口数量存在负相关关系,相关系数分别为 0.48、0.8,说明湿地面积对人口数量响应相对 GDP 响应更敏感。

自 1989 年以来,锡林河流域总牲畜量迅速增长,由 1989 年的 7.04×10^5 头(只)增长至 1999 年的 1.20×10^6 头(只),实际载畜量远超过草原的承载能力,生态环境逐渐退化,湿地面积减少。1999 年以后,国家及地方出台系列政策来改善草原生态,流域内牲畜总量显著减少并起伏变化(图 10),牲畜量相对处于稳定状态。由相关性分析可知(表 6),湿地面积与羊的数量呈负相关关系,相关系数为 0.71,表明羊的数量变化对湿地面积影响较大。

3 讨 论

1989—2000 年湿地面积流失严重,由最大值 128.29 km^2 减至最低为 87.23 km^2,湿地的转出面

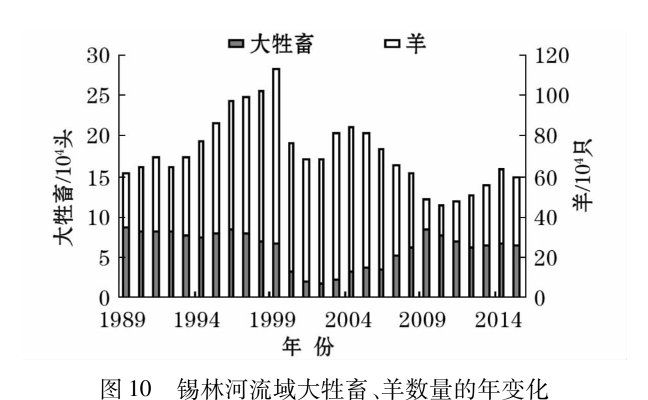


图 10 锡林河流域大牲畜、羊数量的年变化

Fig. 10 Annual variation in the number of largecattle and sheep in Xilin River Basin

表 6　1989—2015 年锡林河流域上游湿地面积与人口数、GDP、大牲畜和羊相关性分析

Tab. 6　Regression analyses between the area of wetland and population, GDP, large cattle and sheep in Xilin River Basin from 1989 to 2015

景观类型	人口数		GDP		大牲畜		羊	
	皮尔逊相关性	显著性	皮尔逊相关性	显著性	皮尔逊相关性	显著性	皮尔逊相关性	显著性
湿地	-0.80	0.05	-0.48	0.33	0.60	0.21	-0.71	0.11

积大于转入面积,主要转出类型为草地和其他。此外,气候由冷干向冷湿方向发展,年降水量以 7.8 $mm \cdot a^{-1}$增加,降水是锡林河流域河谷湿地重要的水分补给来源,降水量与湿地的面积呈正相关关系,李妍妍等[36]在麦地卡湿地也得到相似结论。但这一时期的湿地面积减少 41.06 km^2,其原因这一时期锡林郭勒盟的 GDP 和人口数量持续增高,牲畜量发生了剧烈变化,由 1989 年的 7.04×10^5 头(只),增长到 1999 年的 1.20×10^6 头(只),超出了地区合理载畜量,过度放牧使得湿地退化[37]。另外,随着锡林浩特市旅游业的快速发展,研究区成为了重要的旅游观光景点,无序旅游中马匹和人的过度踩踏导致土壤表层物理性状改变,土壤紧实度增加,容重增加,含水量和孔隙度下降[38],影响了植物生长的土壤环境条件,导致物种多样性的改变,进而改变湿地景观格局。2000—2006 年,有大量其他用地转化为湿地,转入面积 34.09 km^2,草地和其他用地是湿地的主要转入方向。平均降水量增加 3.3 $mm \cdot a^{-1}$,气温保持稳定,湿地水源补给增加,引起草地向沼泽转化,这与张莹莹等[39]在洪湖湿地自然保护区的研究结果一致。2000 年开始,锡林郭勒盟实施了一系列如"退牧还草"和建立"自然保护区"等生态保护措施,牲畜量减低至 7.96×10^5 头(只),较上一阶段减少 34%,为草原生态的恢复发挥了积极作用,湿地面积得以恢复扩大。2006—2015 年,湿地转入面积与转出面积基本一致,湿地面积变化趋于平稳。草地向其他景观类型变化的趋势逐步增加,但是其变化频率和幅度并不明显,就当前研究的时间尺度而言,草地景观类型在研究区内的优势度十分明显。沼泽湿地面积的变化幅度减小,也在一定程度上说明锡林河流域河谷湿地退化的状况得到了初步的遏制。

综合锡林河流域上游土地利用类型变化分析,湿地景观逐渐在向其他景观类型转变,湿地呈退化趋势,湿地环境区域逆向演变,徐晓龙等[15]在巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地也得出类似结论。由于耕地和其他用地面积的扩张,耕地斑块增加且连接成片,使得湿地的景观聚集度降低,斑块密集程度向减少的方向发展。加之地区过度放牧和耕地无序的扩张方式,使得湿地面积在大幅减少的同时,致使其破碎化和空间分布的离散程度不断增加,湿地景观内部的破碎化程度也随之增大,刘红玉等[40]在三江源平原流域也得出了类似的结论。

本文受影像分辨率以及研究时间的影响,湿地的分类没有细化,接下来的研究中可以利用高分辨率的影像对湿地进行细致划分研究,如区分开草甸沼泽和芦苇沼泽。驱动力定量分析不够深入,驱动因子数量较少,开展多驱动因子与湿地时空格局的变化关系以及定量刻画是下一步研究的重点。

4　结 论

(1) 1989—2015 年锡林河上游湿地面积整体呈下降趋势,变化率为 $-1.21\ km^2 \cdot a^{-1}$。1989 年湿地面积最大,为 128.29 km^2,2000 年湿地面积最小,为 87.23 km^2,2011 年之后缓慢回升,湿地面积占比在 2.55% ~3.75% 之间波动,质心整体向西北方向迁移,斑块面积在南北方向呈缩小趋势,而在东西方向呈延长趋势。湿地景观逐渐在向其他景观类型转变,呈退化趋势。

(2) 1989—2015 年,湿地景观斑块数量变化剧烈,斑块数量增加,增幅较大,景观破碎度增大。草地和湿地整体的连通性较好。2011—2015 年景观均呈下降趋势,景观斑块向规则化和集中化趋势发展。景观水平上,湿地最大斑块所占比例减少,斑块趋于复杂化,景观破碎度增大。SHDI 和 SHEI 指数起伏变化,趋于减小,说明湿地景观分布向均衡方向发展。

(3) 湿地面积与温度、GDP、人口数量和羊的数量存在负相关关系,与降水量和大牲畜数量呈正相关关系,湿地面积对降水量和气温具有一定响应关系,对人口数量和羊数量的响应更为敏感。

参考文献(References):

[1] 侯鹏,申文明,王桥,等. 基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究[J]. 生态学报,2014,34(3):660－666. [Hou Peng, Shen Wenming, Wang Qiao, et al. Quantitative analysis of driving factors for wetland degradation based on hydrology balance[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(3):660－666.]

[2] 潘世兵,杨贵羽,唐蕴,等. 黄旗海湿地水量模拟与平衡分析[J]. 干旱区研究,2017,34(2):383－389. [Pan Shibing, Yang Guiyu, Tang Yun, et al. Simulation of water inflow and water balance of Huangqihai Lake Wetland[J]. Arid Zone Research,2017,34(2):383－389.]

[3] 陈翠,刘贤安,闫丽丽,等. 四川南河国家湿地公园生态系统服务价值评估[J]. 湿地科学,2018,16(2):238－244. [Chen Cui, Liu Xian'an, Yan Lili, et al. Evaluation on ecosystem service values of Sichuan Nanhe national wetland park[J]. Wetland Science,2018,16(2):238－244.]

[4] 李伟,孙宝娣,崔丽娟,等. 基于双分界二分式的莫莫格湿地生物多样性维持价值评价[J]. 生态科学,2017,36(1):48－54. [Li Wei, Sun Baodi, Cui Lijuan, et al. Evaluation on the biodiversity maintenance service of Momoge wetland based on a double-bounded dichotomous method[J]. Ecological Science, 2017, 36(1):48－54.]

[5] 张月,张飞,王娟,等. 近40年艾比湖湿地自然保护区生态干扰度时空动态及景观格局变化[J]. 生态学报,2017,37(21):7082－7097. [Zhang Yue, Zhang Fei, Wang Juan, et al. Analysis of the temporal and spatial dynamics of landscape patterns and hemeroby index of the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang, over the last 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7082－7097.]

[6] 武巧文,王玉萍,崔红梅,等. 内蒙古自治区湿地现状及对湿地公园建设的几点建议[J]. 园林科技,2007(2):38－45. [Wu Qiaowen, Wang Yuping, Cui Hongmei, et al. The present situation of wetland in Inner Mongolia autonomous region and some suggestions on the construction of wetland park[J]. Science & Technology of Landscape Architecture,2007(2):38－45.]

[7] 呼群. 中国湿地资源. 内蒙古卷[M]. 北京:中国林业出版社,2015. [Hu Qun. Wetland Resources in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing,2015.]

[8] 杜金龙,朱记伟,解建仓,等. 近25 a关中地区土地利用及其景观格局变化[J]. 干旱区研究,2018,35(1):217－226. [Du Jinlong, Zhu Jiwei, Xie Jiancang, et al. Changes of land use and landscape pattern in the Guanzhong area in recent 25 years[J]. Arid Zone Research,2018,35(1):217－226.]

[9] 魏绪英,蔡军火,叶英聪,等. 基于GIS的南昌市公园绿地景观格局分析与优化设计[J]. 应用生态学报,2018,29(9):2852－2860. [Wei Xuying, Cai Junhuo, Ye Yingcong, et al. Landscape pattern analysis and optimum design of park green space in Nanchang City, China based on GIS[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(9):2852－2860.]

[10] 高艳,毕如田. 涑水河流域景观指数的粒度效应[J]. 中国农学通报,2010,26(13):396－400. [Gao Yan, Bi Rutian. Effects on changing grain size of landscape indices in Sushuihe watershed[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(13):396－400.]

[11] 刘润红,梁士楚,赵红艳,等. 中国滨海湿地遥感研究进展[J]. 遥感技术与应用,2017,32(6):998－1011. [Liu Runhong, Liang Shichu, Zhao Hongyan, et al. Progress of Chinese coastal wetland based on remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application,2017,32(6):998－1011.]

[12] 韩美,张翠,路广,等. 黄河三角洲人类活动强度的湿地景观格局梯度响应[J]. 农业工程学报,2017,33(6):265－274. [Han Mei, Zhang Cui, Lu Guang, et al. Response of wetland landscape pattern gradient to human activity intensity in Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(6):265－274.]

[13] Chen A, Sui X. Landscape and avifauna changes as an indicator of Yellow River Delta wetland restoration[J]. Ecological Engineering,2016,86:162－173.

[14] Sui X, Chen L, Chen A, et al. Assessment of temporal and spatial landscape and avifauna changes in the Yellow River wetland natural reserves in 1990－2013, China[J]. Ecological Engineering, 2015,84(3): 520－531.

[15] 徐晓龙,王新军,朱新萍,等. 1996—2015年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析[J]. 自然资源学报,2018,33(11):1897－1911. [Xu Xiaolong, Wang Xinjun, Zhu Xinping, et al. Landscape pattern changes in alpine wetland of Bayanbulak Swan Lake during 1996－2015[J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(11):1897－1911.]

[16] 黄犁,徐丽萍. 玛纳斯河流域绿洲时空演变及其景观格局变化[J]. 干旱区研究,2019,36(5):1261－1269. [Huang Li, Xu Liping. Spatiotemporal evolution of the oasis and change of landscape pattern in the Manas River Basin[J]. Arid Zone Research,2019, 36(5):1261－1269.]

[17] 孙鸿超,张正祥. 吉林省松花江流域景观格局脆弱性变化及其驱动力[J]. 干旱区研究,2019,36(4):1005－1014. [Sun Hongchao, Zhang Zhengxiang. Change of landscape pattern vulnerability in the Songhua River Basin in Jilin Province and its driving forces[J]. Arid Zone Research,2019,36(4):1005－1014.]

[18] 张玉红,苏立英,于万辉,等. 扎龙湿地景观动态变化特征[J]. 地理学报,2015,70(1):131－142. [Zhang Yuhong, Su Liying, Yu Wanhui, et al. Characteristics of landscape dynamic changes in Zhalong wetland[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(1):131－142.]

[19] 孙倩,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等. 渭干河－库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究[J]. 生态学报,2012,32(10):3252－3265. [Sun Qian, Tasiphulati Teibai, Zhang Fei, et al. Dynamics of land use/cover changes in the Weigan and Kuqa Rivers Delta oasis based on remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(10):3252－3265.]

[20] 闫晓露,钟敬秋,韩增林,等. 近 40 年辽东湾北部围垦区内外滨海湿地景观演替特征及驱动力分析[J]. 地理科学,2019,39(7):1155 - 1165. [Yan Xiaolu,Zhong Jingqiu,Han Zenglin,et al. Driving forces analysis and landscape succession features of Coastal wetland both outside and inside reclamation areas in the Northern Liaodong Bay,China in recent 40 years[J]. Scientia Geographica Sinica,2019,39(7):1155 - 1165.]

[21] Couvillion B R,Fischer M R,Beck H J,et al. Spatial configuration trends in Coastal Louisiana from 1985 to 2010[J]. Wetlands,2016,36(2): 347 - 359.

[22] 宋诗园,曾波,周廷刚,等. 基于 RS 和 GIS 的乌江流域(重庆段)湿地景观动态分析[J]. 中国水土保持科学,2017,15(1):81 - 88. [Song Shiyuan,Zeng Bo,Zhou Tinggang,et al. Dynamic analysis of wetland landscape in Wujiang River Basin (Chongqing section) using remote sensing and GIS technologies[J]. Science of Soil and Water Conservation,2017,15(1):81 - 88.]

[23] 黎明扬,刘廷玺,罗艳云,等. 半干旱草原型流域表层土壤饱和导水率传递函数及遥感反演研究[J]. 土壤学报,2019,56(1):1 - 11. [Li Mingyang,Liu Tingxi,Luo Yanyun,et al. Pedo-transfer function and remote-sensing-based inversion saturated hydraulic conductivity of surfac soil layer in Xilin River Basin[J]. Acta Pedologica Sinica,2019,56(1):1 - 11.]

[24] 李玉凤,刘红玉. 湿地分类和湿地景观分类研究进展[J]. 湿地科学,2014,12(1):102 - 108. [Li Yufeng,Liu Hongyu. Advance in wetland classification and wetland landscape classification researches[J]. Wetland Science,2014,12(1):102 - 108.]

[25] 李大冲,许盼盼,牛振国,等. 历史专题图的大空间范围湿地专题图自动更新[J]. 遥感学报,2018,22(6):1060 - 1075. [Li Dachong,Xu Panpan,Niu Zhenguo,et al. Automatic updating method for large-scale wetland mapping based on existing thematic map [J]. Journal of Remote Sensing,2018,22(6):1060 - 1075.]

[26] 段利民,李玮,刘廷玺,等. 半干旱草原型流域径流变化特征及其影响因子定量分析[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(10):125 - 130. [Duan Limin,Li Wei,Liu Tingxi,et al. Runoff variation and driven factors qualification for a semi-arid steppe watershed [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(10):125 - 130.]

[27] 席小康,朱仲元,郝祥云. 锡林河流域草原植物群落分类及其多样性分析[J]. 生态环境学报,2016,25(8):1320 - 1326. [Xi Xiaokang,Zhu Zhongyuan,Hao Xiangyun. Grassland plant communities classification and diversity analysis in the Xilin River Basin [J]. Ecology and Environmental Sciences,2016,25(8):1320 - 1326.]

[28] 买尔哈巴·买买提汗,玉素甫江·如素力,安尼瓦尔·阿布都热依木,等. 近 26 a 博斯腾湖芦苇湿地的动态监测及其驱动因素[J]. 干旱区研究,2016,33(4):797 - 804. [Maierhaba Maimaitihan,Yusufujiang Rusuli,Anniwaer Abudureyimu,et al. Dynamic variation of *Phragmites australis* wetland in the Bosten Lake Basin and its driving factors in recent 26 years[J]. Arid Zone Research,2016,33(4):797 - 804.]

[29] 朱长明,李均力,常存,等. 新疆干旱区湿地景观格局遥感动态监测与时空变异[J]. 农业工程学报,2014,30(15):229 - 238,339. [Zhu Changming,Li Junli,Chang Cun,et al. Remote sensing detection and spatio-temporal change analysis of wetlands in Xinjiang arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(15):229 - 238,339.]

[30] 姚云长,任春颖,王宗明,等. 1985 年和 2010 年中国沿海盐田和养殖池遥感监测[J]. 湿地科学,2016,14(6):874 - 882. [Yao Yunchang,Ren Chunying,Wang Zongming,et al. Monitoring of salt ponds and aquaculture ponds in the Coastal Zone of China in 1985 and 2010[J]. Wetland Science,2016,14(6):874 - 882.]

[31] 胡夏天,杨山力,程昌秀. 基于四叉树的景观指数分析方法[J]. 地理信息世界,2016,23(2):21 - 26. [Hu Xiatian,Yang Shanli,Cheng Changxiu. A Method for landscape metrics analysis based on quad-tree coding[J]. Geomatics World,2016,23(2):21 - 26.]

[32] 刘世梁,尹艺洁,杨珏婕,等. 漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响[J]. 生态学报,2017,37(2):619 - 627. [Liu Shiliang,Yin Yijie,Yang Juejie,et al. Assessment of the influences of landscape fragmentation on regional habitat quality in the Manwan Basi[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):619 - 627.]

[33] 郭玉静,王妍,刘云根,等. 普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J]. 生态学报,2018,38(5):1711 - 1721. [Guo Yujing,Wang Yan,Liu Yungen,et al. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(5):1711 - 1721.]

[34] 曹灿,张飞,阿依尼格尔·亚力坤,等. 艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨[J]. 环境科学,2018,39(4):1568 - 1577. [Cao Can,Zhang fei,Aynigar Yalikun,et al. Relationship between landscape pattern and water quality in the Ebinur Lake Region [J]. Environmental Science,2018,39(4):1568 - 1577.]

[35] 陈爱莲,孙然好,陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性[J]. 应用生态学报,2012,23(8):2077 - 2086. [Chen Ailian,Sun Ranhao,Chen Liding. Applicability of traditional landscape metrics in evaluating urban heat island effect [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(8):2077 - 2086.]

[36] 李妍妍,王景升,税燕萍,等. 拉萨河源头麦地卡湿地景观格局及功能动态分析[J]. 生态学报,2018,38(24):8700 - 8707. [Li Yanyan,Wang Jingsheng,Shui Yanping,et al. Analysis of landscape pattern and ecological service function of the Mcdika wetland reserv [J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(24):8700 - 8707.]

[37] 马梅,张圣微,魏宝成. 锡林郭勒草原近 30 年草地退化的变化特征及其驱动因素分析[J]. 中国草地学报,2017,39(4):86 - 93. [Ma Mei,Zhang Shengwei,Wei Baocheng. Temporal and spatial pattern of grassland degradation and its determinants for recent 30 years in Xilingol[J]. Chinese Journal of Grassland,2017,39(4):86 - 93.]

[38] 范春梅,廖超英,李培玉,等. 放牧强度对林草地土壤物理性状的影响——以黄土高原丘陵沟壑区为例[J]. 中国农业科学,2006,39(7):1501 – 1506. [Fan Chunmei, Liao Chaoying, Li Peiyu, et al. A study of the effects of different grazing intensities on soil physical properties of grassland and forest floor: For example hilly and gully regions on the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(7): 1501 – 1506.]

[39] 张莹莹,蔡晓斌,杨超,等. 1974 – 2017 年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J]. 湖泊科学,2019,31(1):171 – 182. [Zhang Yingying, Cai Xiaobin, Yang Chao, et al. Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu wetland nature reserve in recent 40 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 171 – 182.]

[40] 刘红玉,吕宪国,张世奎,等. 三江平原流域湿地景观破碎化过程研究[J]. 应用生态学报,2005,16(2):289 – 295. [Liu Hongyu, Lyu Xianguo, Zhang Shikui, et al. Fragmentation process of wetland landscape in watersheds of Sanjiang Plain, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 289 – 295.]

Driving force analysis and landscape pattern evolution in the up stream valley of Xilin River Basin

ZHOU Ya-jun[1], LIU Ting-xi[1,2], DUAN Li-min[1,2], WANG Yi-xuan[1,2], LI Xia[1], LI Ming-yang[1]

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *Inner Mongolia, China*; 2. *Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization, Hohhot* 010018, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: In order to evaluate the evolution and driving factors of wetland patterns in the upstream valley of the Xilin River Basin, 12 Landsat images from 1989 to 2015 were analyzed. The landscape composition and evolution trend of regional wetland landscapes were studied by the centroid shifting method and landscape index, and the major driving factors of regional wetland changes were also determined. The results allow the following conclusions to be made. (1) The area of the wetland in the upstream of the Xilin River decreased during 1989 – 2015 at a rate of $-1.21\ km^2 \cdot a^{-1}$. The proportion of wetland area ranged from 2.55% to 3.75%. The wet centroid migrated to the northwest, and the plaque area showed a narrowing trend in the south-north, while prolonging in the east-west direction. (2) At the class level, the number of wetland patches in the basin changed drastically during 1995 – 2006. The number of patches increased from 1989 to 2000, indicating an increase in landscape fragmentation, before showing a downtrend in 2011 – 2015, such that landscape patches developed toward regularization and centralization. At the landscape level, the percentage of the largest plaque in the wetland decreased, and the shape of patches tended to be complex, leading to increased landscape fragmentation. The SHDI and SHEI showed an overall decreasing trend, and the distribution of wetland landscape developed toward equilibrium. (3) The wetland area is sensitive to population and the number of livestock. Overgrazing is the key driving force in the shrinking of wetlands and changes in landscape diversity.

Key words: remote sensing; wetland; landscape pattern; evolution; driving force; Xilin River Basin